文章编号:1000-4939(2024)02-0466-11

基于双向流固耦合的倒虹吸管道水击压力波与拱式桥架组合结构动力响应分析

谢小雨[1],李睿[1],崔又文[1,2],李晓章[1],罗仕庭[3]

(1. 昆明理工大学建筑工程学院,650500 昆明;2. 云南省昭通市昭阳区水务局,657000 昭通;
3. 中国电建集团昆明勘测设计院有限公司,650051 昆明)

摘 要:在大跨度倒虹吸管道中有压闸阀关闭时通常伴随着水击现象,当水击发生时,流体与固体的耦合作用同时存在。为研究发生水击时,不同关阀时间下的压力波与考虑耦合作用时结构的动力响应情况,以大跨度倒虹吸管道与拱式桥架结构为研究对象,进行整体水力计算,基于流固耦合分析理论,将整体水力模型计算得到的水击压力波作为流体部分加载条件,在 workbench 平台上进行双向流固耦合分析求解桥架结构的位移、内力及应力动力响应结果。结果表明:不同关阀时间工况下,水击压力波曲线的变化趋势大致相同,结构各监测点的位移时程曲线同水击压力波曲线规律基本吻合;阀门匀速关闭时,增加闸阀的关闭时间可以作为降低倒虹吸管道水击压强的有效措施;水击力对桥架管道的影响最大,盖梁次之,拱圈最小,结构以发生顺桥向动力响应为主。

关键词:大跨度倒虹吸;闸阀;双向流固耦合;水击压力波;动力响应分析

中图分类号:TV672.5　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.020

Dynamic response of water-hammer pressure wave and arch bridge composite structure of inverted siphon pipeline based on two-way fluid-structure coupling

XIE Xiaoyu[1], LI Rui[1], CUI Youwen[1,2], LI Xiaozhang[1], LUO Shiting[3]

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, 650500 Kunming, China;
2. Water Affairs Bureau of Zhaoyang District, 657000 Zhaotong, China;
3. Power China Kunming Survey and Design Institute CO., LTD., 650051 Kunming, China)

Abstract: When the pressure gate valve is closed in the large-span inverted siphon pipeline, it is usually accompanied by the phenomenon of water hammer. At the same time, the coupling effect of the fluid and the solid exists. In order to study the pressure wave under different valve closing time and the dynamic response of the structure with considering the coupling effect, the overall hydraulic calculation is carried out

收稿日期:2022-04-25　　**修回日期:**2022-07-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51568029);云南省交通厅科技开发项目(云交科 2014(A)25);云南省交通运输厅科技计划项目(云交科教编[2020]18 号)
通信作者:李睿,教授。E-mail:liruiking@163.com
引用格式:谢小雨,李睿,崔又文,等. 基于双向流固耦合的倒虹吸管道水击压力波与拱式桥架组合结构动力响应分析[J]. 应用力学学报,2024,41(2):466-476.
XIE Xiaoyu, LI Rui, CUI Youwen, et al. Dynamic response of water-hammer pressure wave and arch bridge composite structure of inverted siphon pipeline based on two-way fluid-structure coupling[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2): 466-476.

with taking the large-span inverted siphon pipeline and the arch bridge structure as the research objects. Based on the fluid-structure coupling analysis theory, the water hammer pressure wave calculated by the overall hydraulic model is used as the loading condition of the fluid part, and the two-way fluid-structure coupling analysis is carried out on the workbench platform to solve the displacement, internal force, and stress of the bridge structure. The results show that under different valve closing time conditions, the change trend of the water hammer pressure wave curve is roughly the same, and the displacement time history curve of each monitoring point of the structure is basically consistent with the law of the water hammer pressure wave curve. When the valve is closed at a constant speed, increasing the closing time of the gate valve can be an effective measure to reduce the water hammer pressure; the water hammer force has the greatest effect on the bridge pipe, followed by the cover beam, and the arch ring is the smallest, and the dynamic response of the structure mainly occurs along the bridge direction.

Key words: large-span inverted siphon; gate valve; two-way fluid-structure coupling; water hammer pressure wave; dynamic response analysis

水击作为压力管道内动水压力变化最有代表性的现象,是以一种压力波的形式沿着管壁传播。倒虹吸拱式桥架上部倒虹吸压力管道,可能会由于出口处阀门的突然关闭,导致之前仍然处于流动状态的阀门上游处水体突然被迫停止,此时从惯性流动状态突然停止的水体中蕴含的巨大能量急需耗散,因此在水体中会产生较高的压强(可达管道正常工作压力的几十倍不止),同时由于水体的可压缩性又会产生沿着管路系统来回传导的压力波,管道系统内的压力容易发生反复急剧的变化,往往会引起管道系统的强烈振动[1-2],引发管道失效,严重时甚至会引发工程事故,因此,对阀门关闭过程中产生的水击现象的研究显得十分重要。

水击的常用计算方法有特征线法,有限元法、有限差分法[3],对于有压管道水击作用的计算,WYLIE 和 STREETER[4] 在 1974 年提出了具有开创性的特征线法,目前为止,特征线法依然是管道水击计算的主要理论方法,但特征线法是一维计算方法,并未考虑管道的空间效应[5]。近年来,随着计算流体力学理论(computational fluid dynamics, CFD)不断发展与计算机性能的不断突破,已有学者将 CFD 技术运用于大型流体有限元数值仿真分析中,发现数值模拟结果更接近实际[6-8]。华晔和 GUO 等[9-10] 分别利用 CFD 与 Fluent 软件对管道中的阀门关闭进行了动态模拟,发现 CFD 技术可以成功地用于水击现象的建模。李佳等[11] 使用滑移网格技术与自定义函数(user defined functions, UDF)功能分别对长直管道下的球阀、蝶阀和闸阀 3 种阀门的水击压强变化规律进行了模拟研究,但倒虹吸管道不同于长直管道。许文奇等[12] 通过建模分析研究不同关阀规律对球阀流场和水击压强的影响,并未针对闸阀进行详细研究。

固体结构在流场作用下会发生变形或运动,这种变形或运动反过来也会对流场产生影响,导致流场发生改变,而流场的改变又反过来改变作用在固体结构上的流体荷载的大小和分布,从而形成流体与固体结构的相互作用、相互影响,即流固耦合作用(fluid structure interaction, FSI)[13]。这种流固耦合作用,几乎涉及所有的工业行业,在输水管道中尤为明显[14]。谭颖[2] 使用 ADINA 软件对水电站压力管道的水击进行了双向流固耦合模拟,发现固体域参数对水击压强的影响不可忽视。于腾等[15] 在 workbench 平台上对某倒虹吸工程底部明钢管段进行双向流固耦合求解,结果符合实际,并达到工程精度要求。可见,有压输流管道的流固耦合问题,已有学者进行了相关研究并取得了一定进展,但研究对象并未涉及倒虹吸桥架结构。而对于倒虹吸结构的动力响应方面研究的相关报道较少,陈丹、王慧、冯光伟、张炜超等[16-19] 针对倒虹吸在地震作用下的结构动力响应做了相关研究,研究内容并未涉及发生水击时的考虑流固耦合时的结构动力响应。

为详细研究大跨度倒虹吸长直管道闸阀考虑流固耦合作用时关阀下的水击现象,本研究借助有限元软件针对大跨度倒虹吸管道的闸阀关阀时产生的水击现象展开仿真计算[20],获取不同关阀时间的水击压力波的特性以及结构的动力响应。

1 基本原理

1.1 倒虹吸水力计算算法

在进行倒虹吸水力计算时,一般选用 k-ε 模型作为管内水体流动的湍流模型[21-23]。其中,k 表示湍动能,ε 表示湍流耗散率。k-ε 湍流模型可靠性高、收敛性好、内存需求低、应用面广,适用于无分离、可压缩以及不可压缩等流动问题。

本研究使用的标准 k-ε 方程如下。

连续方程

$$\partial u_j / \partial x_j = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + v\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[v_\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - g_i \tag{2}$$

湍动能方程(k 方程)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho\varepsilon \tag{3}$$

湍动能耗散率方程(ε 方程)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{5}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

式中: $C_{1\varepsilon}$ 、$C_{2\varepsilon}$ 为常系数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 对应的普朗特数,均为常系数; C_μ 为经验常数。本研究倒虹吸模型参数取值如表 1 所示。

表 1 k-ε 方程模型中的常数取值

Tab. 1 k - ε Constant values in equation models

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

1.2 流固耦合算法基本原理

流固耦合问题可由其耦合方程来定义,这组方程既包含流体域又包含固体域。流体动力学在满足质量、能量、动量 3 个基本守恒定律的前提下,派生出 3 个基本方程,分别为质量守恒方程、能量守恒方程和动量守恒方程,可以用如下通式表示[23-24],即

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \boldsymbol{u} \varphi) = \mathrm{div}(\Gamma \mathrm{grad}\varphi) + S \tag{7}$$

式中: ρ 为质量密度; φ 为通用变量,可以表示速度矢量 $\boldsymbol{u}$ 在 x 、y 和 z 方向的分量(u 、v 、w)、温度 T 等变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; grad 表示梯度; div 表示散度,且

$$\mathrm{div}(\alpha) = \partial\alpha_x/\partial x + \partial\alpha_y/\partial y + \partial\alpha_z/\partial z \tag{8}$$

固体部分可由牛顿第二定律导出,即

$$\rho_s \ddot{\boldsymbol{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{f}_s \tag{9}$$

式中: ρ_s 为固体密度; $\boldsymbol{f}_s$ 为体积力矢量; $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为柯西应力张量; $\ddot{\boldsymbol{d}}_s$ 为当地加速度矢量。

流固耦合必须满足守恒的基本原则,表现在耦合界面处,流体域与固体域的位移 d 、应力 τ 、温度 T 、热流量 q 等变量也应相等或守恒,即

$$\begin{cases} \tau_f n_f = \tau_s n_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \tag{10}$$

式中:式左表示流体域,用下标 f 表示;式右表示固体域,用下标 s 表示。

式(7)~式(10)构成了流固耦合分析的基本控制方程,联立以上方程组,并根据耦合实际情况,给定边界条件和初始参数就可以得到流固耦合分析的各项参数解。

流固耦合的解法有两种[24-25]:直接耦合解法和分离解法。分离解法按设定顺序依次求解固体或流体的控制方程,通过流固交界面把固体域和流体域的计算结果相互交换传递,每一步达到收敛后再进行下一步求解,直到求得最终稳定的结果。分离解法可稍作修改直接利用已有的 CFD 软件,可用于求解实际复杂的流固耦合分析模型,因此本研究选择分离解法求解。

2 工程建模

2.1 背景工程

小鱼坝倒虹吸位于滇中引水工程昆明段,其总体布置图如图 1 所示,上接蔡家村隧洞,下接松林隧洞,采用拱桥式倒虹吸跨越螳螂川。小鱼坝倒虹吸

水平长 717.4 m,实长 782.2 m,输水钢管采用 3 根内径 4.2 m 的 Q345C 压力钢管,钢管壁厚为 32 mm,最大静水头约 137.3 m,倒虹吸设计流量为 3 管总和 100 m^3/s。

2.2　模型建立

2.2.1　倒虹吸整体水力模型建立

本研究采用 Fluent 建立倒虹吸整体水力模型,根据 3 根倒虹吸管几乎一致与倒虹吸结构对称的特性,选取中间管道并将直径 4.2 m 倒虹吸管道流体取中间面作为对称面进行简化建模为 1/2 管进行分析。

根据进口上游明渠底宽 4.2 m,水深 7.71 m,设计单管流量 33.3 m^3/s,得到稳态入口边界流速为 $Q/A=1.028$ m/s(Q 为设计单管流量,A 为明渠截面积);倒虹吸管壁均设置为壁面,壁面设置为无滑移边界,将倒虹吸管壁粗糙高度设置为 0.000 5[26];出口采用自由出流 outflow 条件,使用稳态压力分离式求解器,二阶离散格式,SIMPLE 算法;为保证计算结果收敛性好,将收敛残差标准均置设为 10^{-5},设置完毕最后初始化并进行计算。计算模型如图 1 所示。

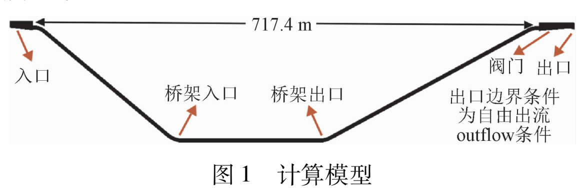


图 1　计算模型

Fig. 1　Computational model

2.2.2　网格划分

采用 Fluent meshing 软件对 1/2 管倒虹吸流体结构进行网格划分。为了提高计算精度,倒虹吸管内水体几何模型均采用六面体网格结构性网格,并在阀门处、管道连接处等主要研究部位进行网格加密,得到倒虹吸整体计算域网格数量为 267 634,部分网格划分结果如图 2 所示。

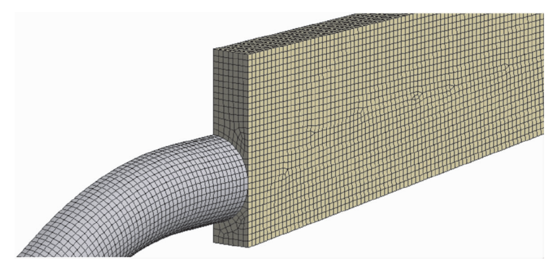


图 2　网格划分

Fig. 2　Mesh generation

2.2.3　瞬态计算中阀门开合过程的模拟与设置

阀门关闭方式有变速关阀以及匀速关阀等多种方式,采用合适的变速关阀方法可以有效降低水击的最大压强值[27-28]。为研究水击压强与阀门不同关闭时间之间的关系,考虑阀门关闭为匀速关闭时的不利工况,设置关阀工况为 10、20、30、60、75 s 下匀速关阀。

本研究所分析的倒虹吸结构出口调节阀为闸阀,阀门匀速开闭运动由 layering 和 events 动网格技术同时实现,通过自定义函数(UDF)编写闸阀高度随时间变化的函数[29]来控制阀门网格的运动,实现阀门从全开至关闭过程的模拟。水击压力计算一般需考虑流体的压缩性,因此,此时边界条件改选择为压力边界条件。

2.2.4　流固耦合分析模型建立

对于底部管段桥架结构的流固耦合动力响应分析,研究表明有压输水管道水击振动在双向流固耦合方法下计算的结果较为精确[2,30]。本研究倒虹吸整体空间尺寸极大,且布置形式复杂,耦合计算时域长,进行整体计算的可行性小、收敛性差,且桥架所在的倒虹吸底部管段,其两端就有限制管道位移的镇墩,故本研究根据倒虹吸的结构特性以及探究桥架结构动力特性,为主要研究目的,选取桥架结构所在的底部管段,只考虑水击波传至此处时底部管道、桥架和管内流体的耦合作用。

本研究采用线弹性本构模型进行建模,固体部分模型的材料属性均按照实际工程中的材料属性设置,桥架结构材料均采用 C45 混凝土,支承环、倒虹吸钢管采用 Q345 钢材。模型中管道、支承环、桥架结构均采用 SOILD186 实体单元,网格共计156 511 个单元。网格均为六面体结构性网格划分。模型的边界条件按照工程实际情况进行设置:桥架结构的排架底部、拱脚采用固结方式,约束所有方向的自由度;倒虹吸管道在水流入口侧和出口侧均设置有轴向刚度 30.5 kN/mm 的伸缩节,因此在此处释放管道顺桥向的平动自由度,以弹簧刚度模拟伸缩节;倒虹吸管道与支承环之间采用 Bonded 的接触方式;对于支座刚度均采用刚性连接。

管内水体建模采用的是 FLUID30 单元,FLUID30 是 Ansys 中的流体声学单元,主要用于模拟流体介质及流(声)固耦合问题,在 Workbench 中将管内水体定义为声学区域,其就会自动转化为 FLU-

ID30 单元。在输入管内水体的材料属性时,需要输入流体的材料密度(密度取为 1 000 kg/m^3)及流体声速(取为 1 497 m/s),流体黏性产生的损耗效应忽略不计(黏度 Viscoty 取 0),流体域计算模型的最终网格总数为 128 304 个。本研究的流固耦合湿模态采用声固耦合法计算。

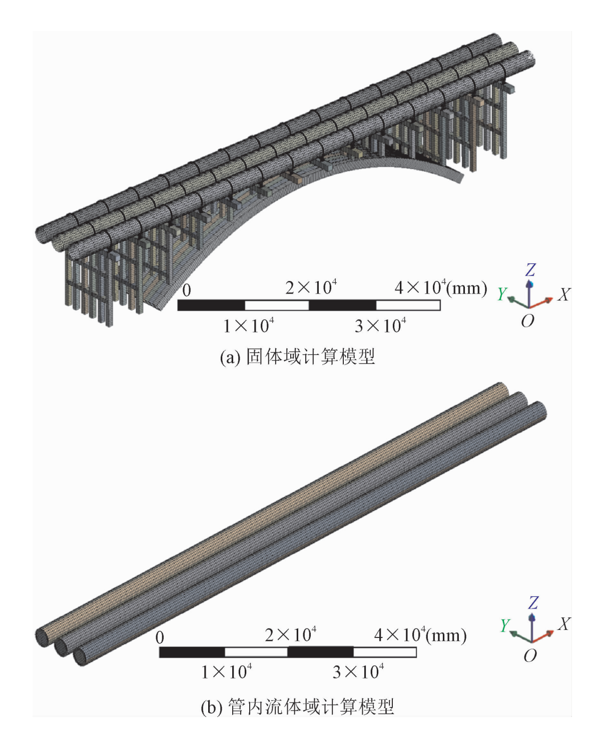


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

为提高计算的收敛性及准确性,将最大流速稳态运营时的水体计算结果,即稳态运营时的流动状态的水击波施加到水体的入口、出口处并在 Fluent 中激活管壁动网格。将管道内壁设置为流固耦合交界面(FSI),最后使用软件自带的 System Coupling 数据交换平台将水体与桥架结构连接,workbench 中双向流固耦合设置如图 4 所示。

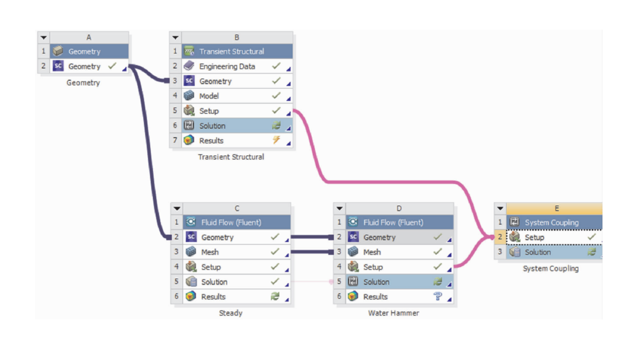


图 4 双向流固耦合设置图

Fig. 4 Two-way fluid-structure coupling setup diagram

3 结果分析

3.1 水击压强计算结果

为了获取下文流固耦合计算所需的管道内压力波动,在倒虹吸计算域设置了 6 个监测点 P1 ~ P6,监测点布置如图 5 所示。

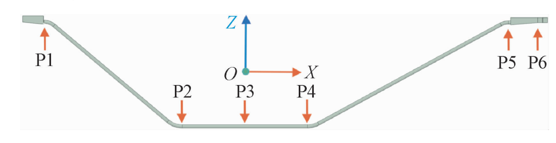


图 5 监测点布置图

Fig. 5 Layout of monitoring points

经计算,倒虹吸模型出入口过流能力均为 33.2 m^3/s,而最大设计流量为 33.3 m^3/s,计算结果与设计流量差为 0.3%,因此计算精度基本满足要求,模型符合实际流动规律。

提取倒虹吸水体监测点 P1 ~ P6 的压强-时间曲线如图 6 ~ 10 所示,将不同关阀时间下的桥架出口监测点 P6 的压力-时间曲线在阀门完全关闭的瞬间时刻对齐,得到图 11 所示的各曲线相位对比图。

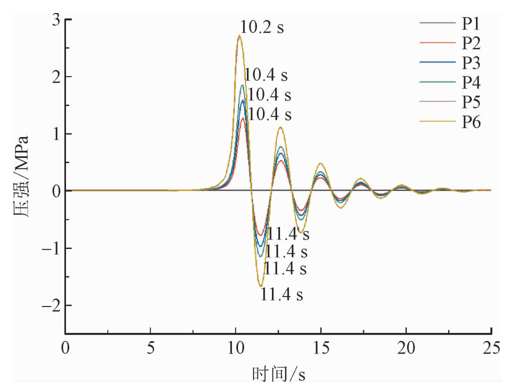


图 6 10 s 关阀压强-时间图

Fig. 6 Diagram of 10 s valve closing pressure-time

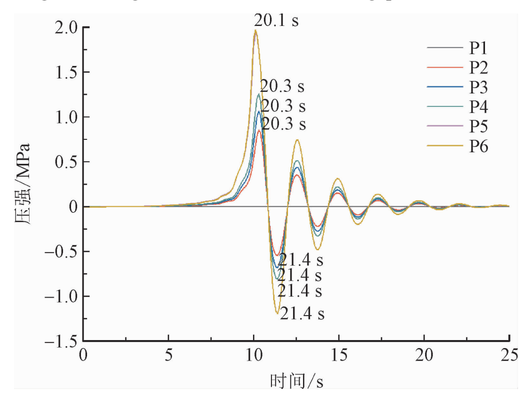


图 7 20 s 关阀压强-时间图

Fig. 7 Diagram of 20 s valve closing pressure-time

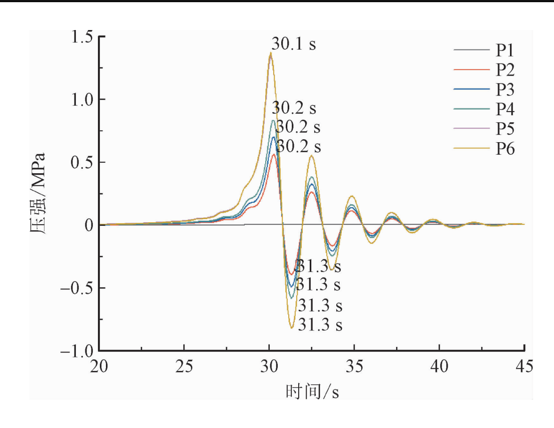


图 8　30 s 关阀压强-时间图

Fig. 8　Diagram of 30 s valve closing pressure-time

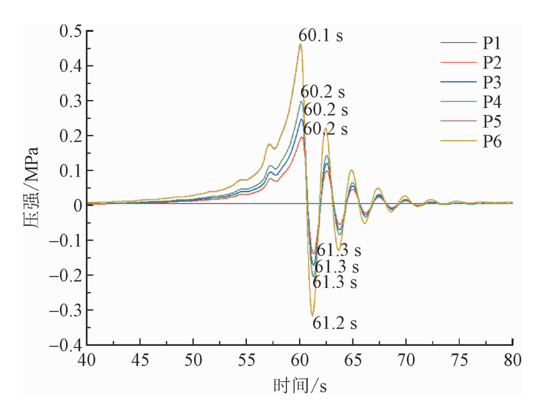


图 9　60 s 关阀压强-时间图

Fig. 9　Diagram of 60 s valve closing pressure-time

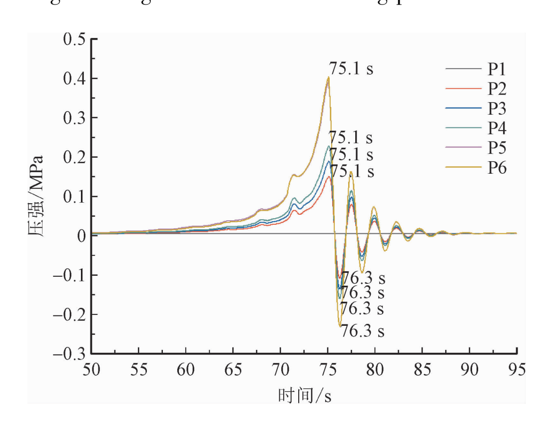


图 10　75 s 关阀压强-时间图

Fig. 10　Diagram of 75 s valve closing pressure-time

由图 6～10 可得到如下结果。

1)不同关阀时间下,不同监测点得到的压强-时间曲线都有相同的变化趋势,即随着阀门开度的减小,水击压强逐渐升高,阀门开度减小为 0 时,水击压强达到峰值,再逐渐振荡至归 0,且任意关阀时间下各监测点压强峰值变化规律基本一致。说明同一倒虹吸结构的计算结果具有普遍性,能够反映客观规律。

2)在阀门完全关闭前,各监测点的水击压强峰值随着关阀时间增长而减小,呈负相关,如监测点 P6 在 10 s 关阀时的压强值为 2.719 MPa,75 s 关阀时 P6 的压强值则为 0.404 MPa,时间增加了 7.5 倍,而水击压强减小了 6.73 倍,因此通过增加倒虹吸管道阀门的关闭时间,可以有效地降低水击压强,这与谭颖,许文奇等[12]的研究结论一致,从侧面验证了本研究结果的合理性。

3)观察图 11 可得:对比发现不同关阀时间下曲线相位并不完全一致,随着关阀时间的增加,管内水体的水击能量随之减小,水击压力波曲线的振荡周期缩短,能量耗散速率也随着加快。

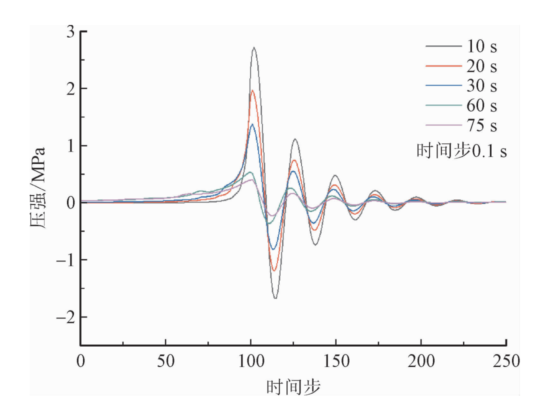


图 11　不同关阀工况下的相位对比图

Fig. 11　Diagram of phase comparison under different valve closing conditions

3.2　水击作用下桥架结构的流固耦合动力响应分析

管内水体在水击作用下产生剧烈的压力波动,压力波动传播至桥架处,便会导致管道振动,再由此导致桥架也产生振动。由于倒虹吸桥架结构主体为拱桥,两侧为排架,动力响应分析时应取倒虹吸管道、两侧边墩盖梁、主拱圈拱脚、1/4 跨、拱顶等部位的关键节点进行分析,其中 C1～C5 为拱圈监测点,B1～B8 为排架盖梁监测点,A1～A4 为管道监测点,①～⑭为排架结构,本研究的动力响应均不考虑静力效应,均使用水击荷载下的相对值来描述。

为方便描述结构的动力响应,选取对比分析使用的监测点的布置如图 12 所示。

由前述分析可知,任意关阀时间工况下,水击压力波曲线都表现出了大致相同的变化趋势。因此,限于篇幅,本研究选取 10 s 水击波对中间管道单独运营关阀的工况进行流固耦合分析,得到结构在水击下的动力行为特性。

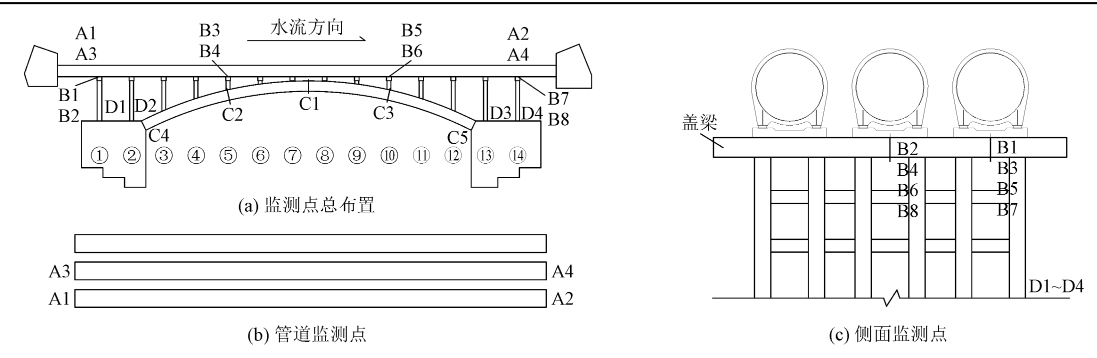


图12 监测点布置图

Fig. 12 Layout of monitoring points

3.2.1 整体结果

管道和桥架的位移云图和应力云图如图13所示。

水击压强达到最大值时，倒虹吸管道最大位移为7.156 mm，最大等效应力为144.78 MPa，最大值所在部位位置均为中间管道出口端；桥架结构随着管道一起往跨中挤压，最大位移为4.620 mm，最大拉应力为6.119 MPa，最大压应力为5.511 MPa，最大值位置均为14#盖梁跨中，说明14#盖梁动力响应最大。

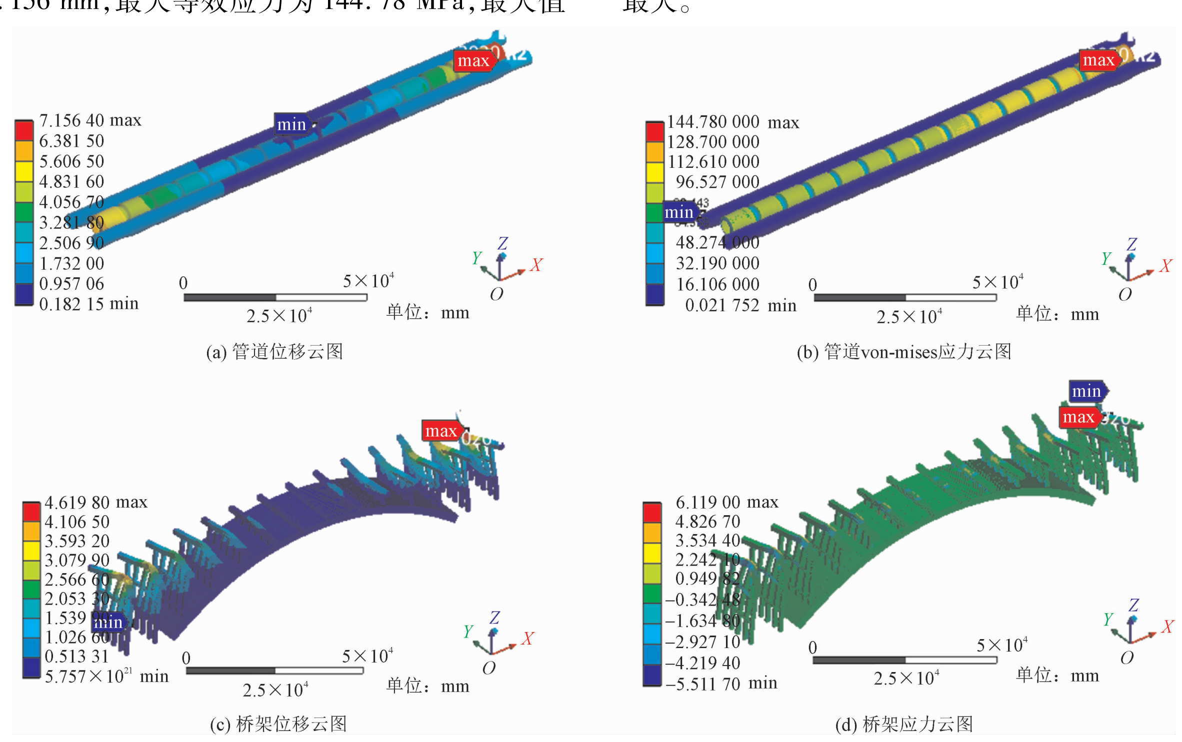


图13 水击压强达到最大值时结构的位移云图和应力云图

Fig. 13 Displacement nephogram and stress nephogram of the structure when the water hammer pressure reaches the maximum value

3.2.2 位移结果

图14为结构入口侧和出口侧的部分监测点时程曲线，可明确说明此时结构的动力行为特征。

由图13~14可得到如下结果。

1）图14(a)~(f)分别为倒虹吸管道、排架盖梁和桥架主拱圈入口侧和出口侧监测点的位移时程图。可以看出，各监测点的位移时程曲线波形和水击波形一致，各监测点入口端和出口端的顺桥向位移方向相反，而横桥向、竖向的位移方向则相同。再结合图13，可以看出：在水击力作用下，10.4 s时刻，水击波压强达到最大正压，这时倒虹吸中间管道带动着桥架一起从两端往跨中纵向挤压，结构位移达到最大，然后水压开始逐渐减小，在11.4 s达到最大负压，管道带动着桥架向两端纵向拉伸。说明水击力作用在倒虹吸桥架上时，首先对管道产生作用，随着水体压强的变化管道在纵桥向、横桥向以及竖向来回振荡，带动着桥架一起来回振荡，并随着时间增加，水击波能量衰减，结构振幅也逐渐减小。

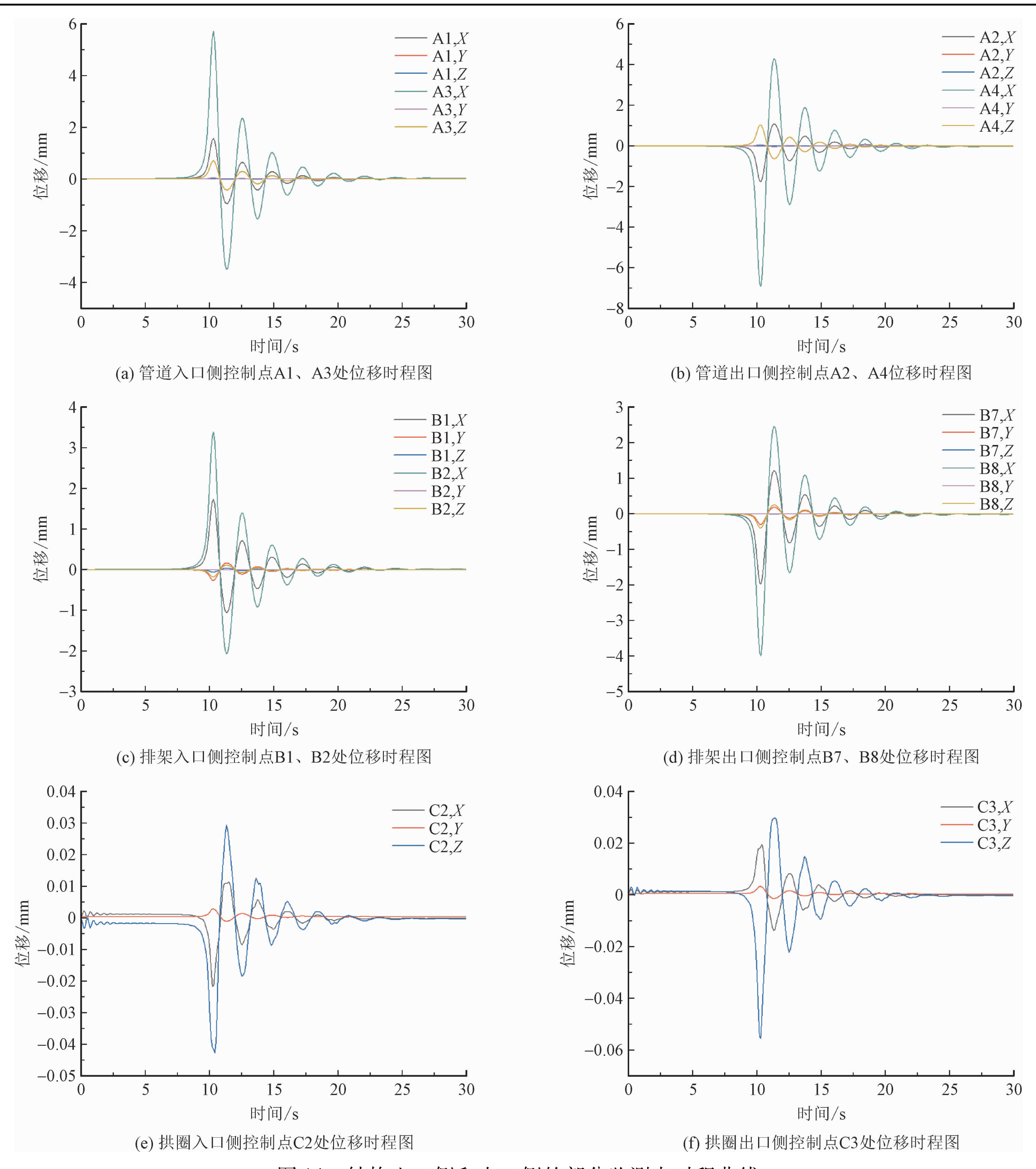


图 14　结构入口侧和出口侧的部分监测点时程曲线

Fig. 14　Time-history curves of some monitoring points on the inlet and outlet sides of the structure

2)根据时程图可以看出:倒虹吸桥架发生水击时各监测点的顺桥向位移响应最大,竖向次之,横桥向位移响应最小,说明水击作用下结构以顺桥向位移为主;出口端位移响应值大于入口端,且位移响应绝对值 B8 处 > B2 处 > B6 处 > B4 处,说明位移响应从桥架两端往跨中逐渐减小,并且发生水击的点的位移响应大于未发生水击的点。

3)倒虹吸管道位移值最大,排架盖梁位移值次之,主拱圈位移值最小;主拱圈 1/4 处和拱顶的位移值和盖梁相比较小,其原因一是拱圈刚度较大,不易变形,二是水击波主要作用于倒虹吸管道,再经由盖梁→排架→拱圈的传力路线,所分担的力小于盖梁。

3.2.3　内力、应力结果

为研究结构的动力响应,将桥架结构的各监测点和监测点所在截面进行监测,得到桥架结构各监测点所在控制截面在整个水击过程中的最大内力值及最不利应力表。对于表 2 列出的内力值,主拱圈监测点(C1 ~ C5)的面内指的是整体坐标系下的 *XZ* 平面,排架盖梁监测点(B1 ~ B8)的面内指的是整体坐标系下的 *YZ* 平面,而对于表 3,管道监测点(A1 ~ A4)最不利应力指的是 von-mises 应力,桥架监测点(B1 ~ B8)最不利应力指的是第一主应力 σ_1(拉)和

第三主应力 σ_3(压)。

表2 监测点所在截面最大内力响应表

Tab.2 Maximum internal force response table of the section where the monitoring point is located

监测点	轴力/kN	面内剪力/kN	面外剪力/kN	扭矩/(kN·m)	面内弯矩/(kN·m)	面外弯矩/(kN·m)
B1	18.0	9.5	132.4	143.6	31.3	345.4
B2	508.5	0.2	0.1	0.1	336.8	2 218.7
B3	25.6	27.4	45.0	2.2	5.3	113.8
B4	653.1	0.2	0.2	0.1	304.1	572.0
B5	28.7	31.3	35.2	0.0	12.2	78.0
B6	733.4	0.2	0.0	0.1	339.8	437.9
B7	13.6	19.2	158.0	171.9	31.4	385.2
B8	696.7	0.4	0.1	0.0	443.4	2 659.2
C1	1 264.0	30.1	0.1	0.1	563.6	1.2
C2	569.9	156.2	0.1	0.1	575.9	0.8
C3	644.2	156.1	0.0	0.1	846.6	1.9
C4	195.7	118.3	0.0	0.2	436.6	1.0
C5	261.8	122.6	0.0	0.4	416.6	1.1

表3 监测点所在截面最不利主应力响应表(单位:MPa)

Tab.3 The most unfavorable principal stress response table of the section where the monitoring point is located(unit:MPa)

监测点	σ_1(von-mises 应力)	σ_3
A1	0.521	
A2	0.456	
A3	99.294	
A4	143.090	
B1	0.662	-0.678
B2	4.769	-4.317
B3	0.223	-0.200
B4	0.803	-0.785
B5	0.174	-0.149
B6	1.709	-1.057
B7	0.790	-0.802
B8	5.826	-5.206
C1	0.081	-0.132
C2	0.065	-0.108
C3	0.069	-0.111
C4	0.032	-0.056
C5	0.038	-0.058
D1	0.595	-0.495
D2	0.491	-0.408
D3	0.558	-0.457
D4	0.696	-0.574

根据表2、表3可以得到如下结果。

1)内力响应和位移响应规律一致,水击作用对排架盖梁内力影响最大,对拱圈的影响较小;排架B7、B8处的内力响应最大,且该部位作为横梁,其顺桥向的水击力导致面外动力响应,面外最大弯矩为2 659.2 kN·m,面外最大剪力为158 kN;而竖向的面内最大弯矩为443.4 kN·m,面内最大剪力为19.2 kN,远小于其顺桥向的响应。同样的,顺桥向的力导致拱圈产生内力,因此其动力响应主要表现在顺桥 X 向激励作用下的轴力及面内弯矩、面内剪力。说明在水击力作用下,顺桥向的力对桥架结构的影响更大。

2)最不利应力响应同样和位移响应规律一致,均体现出了上述水击作用下结构的几个特点:出口侧比入口侧响应大、桥架两端比跨中响应大、排架盖梁比主拱圈响应大,因此主应力结果也能非常直观的体现出各个监测点的受力情况。

4 结 论

本研究以流固耦合分析理论为基础,将整体水力模型计算得到的水击压力波作为流体部分加载条件,以10 s关阀时间工况为例,在workbench平台上进行双向流固耦合分析结构的响应情况,得出如下结论。

1)不同的关阀时间对管道的水击规律没有影响,即任意关阀时间工况下,水击压力波曲线的变化趋势大致相同。并且在流固耦合工况下,桥架结构各监测点的整个水击过程的位移趋势基本和水击波曲线规律吻合。

2)阀门关闭时间越短,使管道内的压力变化越剧烈,管道内各监测点产生的水击压强越大,越容易对管道造成破坏;而随着关阀时间的增加,管内水体的水击能量随之减小,水击压力波曲线的振荡周期缩短,水击压力波的传播过程中的能量耗损速率加快,因此增加倒虹吸管道闸阀的关闭时间可以作为降低倒虹吸管道水击压强与桥架结构在水击作用下的动力响应的有效措施。

3)水击波为纵桥向动荷载,对结构的影响也主要体现在顺桥向的动力响应上,具体表现为:水击作用下,结构以顺桥向位移为主,竖向次之,横桥向最小;在水击力的激励下,排架盖梁与主拱圈顺桥向的内力响应明显大于其他方向,因此在设计时要着重

考虑桥架结构的顺桥向刚度。

4)发生水击时,管道由于动水压力的作用,会在 X 轴方向上来回振荡,振荡幅度随着时间推移逐渐变小,而支承管道的排架结构,由于刚度不足不能有效限制管道的变形,便随着管道一起来回摆动,当摆动传导致主拱圈时,水击能量已被消耗大半,因此,管道动力响应 > 排架盖梁动力响应 > 主拱圈动力响应。在结构设计时要着重考虑桥架结构的管道的受力性能,在管道关阀时要时刻监控结构管道的受力情况。

5)在倒虹吸结构实际运营过程中,可能会出现单管运营的工况。而在单管水击作用下,桥架结构出口侧与管道连接的盖梁构件会发生大幅度的不均匀变形,受力极为不利,相应的排架底部也会产生较大拉应力,建议这些部位在设计时也应着重考虑,并考虑可以在倒虹吸管道支承与桥架盖梁之间布置减隔震支座,改变顺桥向刚度,使其在水击力作用下吸收缓冲大量外荷载能量,将其作为有效阻隔上下部结构振动的措施,以降低桥架结构在水击力下的动力响应,支座具体刚度值应结合结构的其余动力特性及实际情况选取。

6)在水击力作用下,水击波为纵桥向动荷载,结构的表现形式为来回振动,因此后续应进一步考虑分析可能发生的水击共振现象及水击疲劳现象;

7)本研究均为有限元仿真分析,结果均是基于理论分析所得到的,并无实际试验数据支撑,下一步计划将双管运营工况、3 管运营工况以及水的流速、关阀方案与关阀规律等其他应考虑的影响水击压强大小的因素考虑进有限元模型中,并结合相关规范等具体数值进行分析比较,以得到更具有代表性、适用性的结果。

参考文献:

[1] 王文婷,路宏. 浅析压力管道中水击现象的危害及预防[J]. 内蒙古石油化工,2013,39(8):92-94.
WANG Wenting,LU Hong. Analysis on the harm and prevention of water hammer in pressure pipelines[J]. Inner Mongolia petrochemical industry,2013,39(8):92-94(in Chinese).

[2] 谭颖. 水电站压力管道流固耦合水击及其振动特性的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.

[3] 赵钰,钱利勤,涂忆柳,等. 多重阀门关闭降低高压管道水击压力的机理和实验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(35):312-317.
ZHAO Yu,QIAN Liqin,TU Yiliu,et al. The mechanism and experimental study on reducing water hammer pressure by closing multi-valves[J]. Science technology and engineering,2017,17(35):312-317(in Chinese).

[4] STREETER V L,WYLIE E B. Waterhammer and surge control [J]. Annual review of fluid mechanics,1974,6(1):57-73.

[5] 席志德,马建中,孙磊. 空间管道的水锤效应的 CFD 研究方法[J]. 核动力工程,2012,33(6):17-20.
XI Zhide,MA Jianzhong,SUN Lei. Study on effect of water hammer in space pipe with CFD[J]. Nuclear power engineering,2012,33(6):17-20(in Chinese).

[6] WEN F F,CHENG Y G,MENG W W. Dynamic hydraulic characteristics of a prototype ball valve during closing process analysed by 3D CFD method[J]. LOP conference series:earth and environmental science,2018,163(1):012115.

[7] ZHAO H,ZHOU Z J,PENG W B. Research on water hammer phenomenon during stop valve closing process based on CFD[C]// Proceedings of the International Symposium on Big Data and Artificial Intelligence. New York,NY,USA:Association for Computing Machinery,2018:139-145.

[8] NIKPOUR M R,NAZEMI A H,DALIR A H,et al. Experimental and numerical simulation of water hammer[J]. Arabian journal for science and engineering,2014,39(4):2669-2675.

[9] 华晔,廖伟丽. CFD 技术在管道阀门水击计算中的应用[J]. 电网与清洁能源,2009,25(3):72-75.
HUA Ye,LIAO Weili. Application of CFD method in calculation of water hammer for pipe valve[J]. Power system and clean energy,2009,25(3):72-75(in Chinese).

[10] GUO L L,GENG J,SHI S,et al. Study of the phenomenon of water hammer based on sliding mesh method[J]. Applied mechanics and materials,2014,525:236-239.

[11] 李佳,蒋定国,王煜. 长直管道阀门水击压强变化规律数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2016,38(2):7-10.
LI Jia,JIANG Dingguo,WANG Yu. Numerical simulation of change rule of water hammer pressure of a long straight pipe valve[J]. Journal of China Three Gorges University(natural sciences),2016,38(2):7-10(in Chinese).

[12] 许文奇,彭利坤,屈铎. 基于 CFD 的球阀关闭过程水击现象研究[J]. 机床与液压,2017,45(11):170-174.
XU Wenqi,PENG Likun,QU Duo. Research of the water hammer in the process ofclosing ball valve with different regulation based on CFD[J]. Machine tool & hydraulics,2017,45(11):170-174(in Chinese).

[13] 邢景棠,周盛,崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展,1997,27(1):20-39.
XING Jingtang,ZHOU Sheng,CUI Erjie. A survey on the fluid solid interaction mechanics[J]. Advances in mechanics,1997,27

(1):20-39(in Chinese).

[14] 蔡微微.水击试验与数值仿真研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.

[15] 于腾.高水头、长距离倒虹吸管水力特性及结构稳定性研究[D].西宁:青海大学,2017.

[16] 陈丹,晏成明.三维倒虹吸结构动力响应分析[J].长江科学院院报,2015,32(5):137-140.

CHEN Dan,YAN Chengming. Analysis on dynamic response of 3-D inverted siphon structure[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research institute,2015,32(5):137-140(in Chinese).

[17] 王慧,李晓克,赵顺波.复杂地质条件下大型箱型倒虹吸动力响应研究[J].水力发电,2011,37(7):19-22.

WANG Hui,LI Xiaoke,ZHAO Shunbo. Dynamic response of large box-shaped inverted siphon under complex geological conditions[J]. Water power,2011,37(7):19-22(in Chinese).

[18] 冯光伟,胡晓,李庆亮.南水北调中线沁河倒虹吸管身结构动力分析[J].人民黄河,2009,31(7):62-63.

FENG Guangwei,HU Xiao,LI Qingliang. Dynamic analysis of the inverted siphon body structure of Qinhe in the middle line of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Yellow River,2009,31(7):62-63(in Chinese).

[19] 张炜超.大型倒虹吸水工结构动力响应分析[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2015.

[20] 汪建.基于CFD的管路瞬变流流动特性研究[D].杭州:浙江大学,2019.

[21] 李娟.长距离倒虹吸水流特性的三维数值模拟[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.

[22] 巨江.工程水力学数值仿真与可视化[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[23] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.

[24] 姚昌荣,谭庄,周雅宁,等.基于流固耦合理论的泥石流冲击桥墩的动力响应分析[J].应用力学学报,2021,38(5):1831-1838.

YAO Changrong,TAN Zhuang,ZHOU Yaning,et al. Dynamic responses analysis of debris flow impacting pier based on fluid-structre interaction theory[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(5):1831-1838(in Chinese).

[25] 宋学官,蔡林,张华. ANSYS流固耦合分析与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2012.

[26] 于腾,孙新建,高真,等.基于双向流固耦合的高水头倒虹吸管应力特性分析[J].青海大学学报,2016,34(6):67-75.

YU Teng,SUN Xinjian,GAO Zhen,et al. Analysis of the stress characteristics high level water inverted siphon based on the fluid-structure interaction[J]. Journal of Qinghai University,2016,34(6):67-75(in Chinese).

[27] 彭利坤,屈铎,许文奇,等.基于水击防护的球阀关闭规律研究[J].振动与冲击,2018,37(21):41-45.

PENG Likun,QU Duo,XU Wenqi,et al. Closing law of ball valves based on water hammer protection[J]. Journal of vibration and shock,2018,37(21):41-45(in Chinese).

[28] 郭兰兰,耿介,石硕,等.基于UDF方法的阀门变速关闭过程中的水击压强计算研究[J].山东大学学报(理学版),2014,49(3):27-30.

GUO Lanlan,GENG Jie,SHI Shuo,et al. Computing research of the water hammer pressure in the process of the variable speed closure of valve based on UDF method[J]. Journal of Shandong University (natural science),2014,49(3):27-30(in Chinese).

[29] 刘华坪,陈浮,马波.基于动网格与UDF技术的阀门流场数值模拟[J].汽轮机技术,2008,50(2):106-108.

LIU Huaping,CHEN Fu,MA Bo. Numerical simulation of flow field in the valve based on the moving mesh and the UDF[J]. Turbine technology,2008,50(2):106-108(in Chinese).

[30] 张立翔,黄文虎,TIJSSELING A S.水锤诱发弱约束管道流固耦合振动频谱分析[J].工程力学,2000,17(1):1-12.

ZHANG Lixiang,HUANG Wenhu,TIJSSELING A S. Frequency spectrum analysis of liquid-filled pipes under water hammer-induced FSI[J]. Engineering mechanics,2000,17(1):1-12(in Chinese).

(编辑 吕茵)